

VSM: a flexibilidade e a versatilidade do uso no campo da Sustentabilidade**VSM: the flexibility and versatility use in the field of Sustainability**

Marina Ilka Baumer Cardoso* - marina.baumer@gmail.com

Lucila Maria de Souza Campos* - lucila.campos@ufsc.br

*Universidade Federal de Santa Catarina – (UFSC), Florianópolis, SC

Article History:

Submitted: 2017 - 10 - 31

Revised: 2018 - 01 - 14

Accepted: 2018 - 01 - 15

Resumo: As empresas estão sob forte pressão para melhorar e manter a qualidade do produto, atender aos requisitos emergentes para redução do impacto ambiental e ainda responder as exigências de seus *stakeholders*. Nesse cenário, encontrar ferramentas que facilitem seus esforços para melhorar a gestão de suas operações se tornou vital. O mapeamento de fluxo de valor (VSM) é uma técnica importante utilizada na Produção Enxuta (*Lean Manufacturing* - LM) para identificar e visualizar o desperdício. Várias propostas de VSM que incorporam métricas de sustentabilidade estão disponíveis na literatura, o que aumenta sua utilidade como ferramenta para identificar possíveis áreas de melhoria. Aceitando a hipótese de que as ferramentas exercem um papel fundamental no sucesso da LM considerando aspectos da sustentabilidade, esse estudo analisou 14 modelos de VSM encontrados na literatura dos últimos 10 anos (2007 a 2017), identificando os indicadores considerados, bem como a abrangência dos mesmos nos três pilares da sustentabilidade. Pode-se concluir que a ferramenta VSM é adequada para analisar aspectos da sustentabilidade nas operações produtivas, sendo uma ferramenta que, apesar de simples abordagem, apresenta potencial de envolver aspectos ambientais, econômicos e sociais das organizações.

Palavras Chave: Produção Enxuta, Gestão Enxuta, Lean Green, Sustentabilidade, Mapeamento do Fluxo de Valor.

Abstract: Companies are under strong pressure to improve and maintain product quality, meet emerging environmental impact reduction requirements and the stakeholders demands. In this scenario, finding tools that facilitate your efforts to improve the management of your operations has become vital. Value Stream Mapping (VSM) is an important technique used in Lean Manufacturing (LM) to identify and visualize waste. Several VSM proposals that incorporate sustainability metrics are available in the literature, which increases their usefulness as a tool to identify possible areas for improvement. Accepting the hypothesis that tools play a fundamental role in the success of LM considering aspects of sustainability, this study analyzed 14 models of VSM found in the literature of the last 10 years (2007 to 2017), identifying the indicators considered, as well as the triple bottom line of sustainability. It can be concluded that the VSM tool is adequate to analyze aspects of sustainability in productive operations, being a tool that, despite a simple approach, presents potential to involve environmental, economic and social aspects of the organizations.

Keywords: Lean Manufacturing, Lean Management, Lean Green, Sustainability, Value Stream Mapping.

1. Introdução

A Produção Enxuta (*Lean Manufacturing* – LM) tem sido muito utilizada como um método de gestão em vários setores da economia nas últimas décadas e, em muitos casos, trazendo melhores resultados e competitividade para as empresas (Moyano-Fuentes & Sacristán-Díaz, 2012). Sendo considerado o paradigma mais influente na manufatura, LM não só está de acordo com os objetivos organizacionais históricos, como lucratividade e eficiência, mas também com objetivos contemporâneos que incluem a satisfação do cliente, qualidade e capacidade de resposta (Garza-Reyes, 2015; Piercy & Rich, 2015). No entanto, a fim de responder ao crescimento das demandas dos clientes por produtos e serviços que sejam ambientalmente corretos e cumprir com os regulamentos ambientais governamentais, as empresas foram forçadas a repensar estes objetivos e como elas gerenciam suas operações e processos (Miller, Pawloski, & Standridge, 2010; Piercy & Rich, 2015). Em 2009, Kleindorfer, Singhal, & Wassenhove (2009) já apontavam a integração da sustentabilidade com operações *lean* e a gestão da cadeia de suprimento como o maior desafio das empresas contemporâneas.

Uma vez que LM é baseada no conceito de melhoria contínua para manter atividades de valor agregado que os clientes estão dispostos a pagar e para eliminar tudo aquilo que não agrega valor (desperdício, atividades sem valor agregado, sem uniformidade e além da capacidade, por exemplo) (Liker, 2004; Mostafa & Dumrak, 2015; Womack, JONES, & DANIEL, 1996), é evidente que a remoção de resíduos está firmemente relacionada à sustentabilidade, ou seja, a remoção de resíduos pode levar a ganhos ambientais (Dües, Tan, & Lim, 2013). Por exemplo, o transporte eficiente de materiais de fabricação resulta em menores emissões de CO₂ ou ainda, menos produtos defeituosos economizam matérias-primas e energia consumida de produtos que seriam descartados, além de economizar o consumo de energia de reciclagem e reprocesso (Garza-Reyes, 2015). A remoção de resíduos é uma contribuição significativa para a proteção e melhoria do meio ambiente, bem como a maximização da satisfação dos clientes e das organizações (Mostafa & Dumrak, 2015). Por outro lado, traduzir o olhar do desperdício da LM para desperdícios ambientais, econômicos e sociais também funciona como forma de avaliar a sustentabilidade. Foi o que fez Frazier (2008) através de um modelo de mapa de fluxo de valor sob a perspectiva da energia mínima consumida e energia total necessária em um processo produtivo. Já Greinacher, Moser, Freier, Muller, & Lanza (2016) e Kruse, Butzer, Drews, & Steinhilper (2015) inovaram ao avaliar o custo de atividades que agregam e não agregam valor.

É crescente o número de publicações que estudam a relação entre a LM e os pilares da sustentabilidade (Martinez-Jurado & Moyano-Fuentes, 2014). Diversos autores relatam que a nova fronteira da LM é a sua ligação com a sustentabilidade (Fliedner & Majeske, 2010), ou seja, quais resultados nos três pilares da sustentabilidade (ambiental, econômico, social) são impactados pela LM (Martinez-Jurado & Moyano-Fuentes, 2014). O campo da sustentabilidade é emergente e muitos são os desafios para trabalhos futuros: necessidade de pesquisas aplicadas e que trazem resultados práticos, encontro do equilíbrio no *Triple Bottom Line*, indicadores para avaliação da sustentabilidade de prazo maior e alinhamento de objetivos com indicadores identificados são alguns exemplos (Sartori, Latrônico, & Campos, 2011).

Em relação à sustentabilidade ambiental, há um interesse crescente na literatura na ligação entre práticas *lean* com o meio ambiente. As mudanças nas leis que regulamentam o meio ambiente, juntamente com a crescente pressão e demanda dos acionistas, tem exigido mudanças das empresas quanto à responsabilidade ambiental nos últimos anos (Martinez-Jurado & Moyano-Fuentes, 2014). Pesquisadores vêm conectando práticas *lean* ao meio ambiente, promovendo o mantra que “*lean é green*” (Corbett & Klassen, 2006). Estudos nessa área indicam que práticas *lean* são catalisadoras para práticas *green* e que sua integração traz benefícios para as empresas (Dües, Tan, & Lim, 2013). Entretanto, como grande parte dos artigos publicados nessa área são referentes aos últimos 5 anos, a pesquisa de práticas *lean* e *green* ainda está nos estágios iniciais (Garza-Reyes, 2015). Campos & Vazquez-Brust (2016) inclusive sugerem que estudos sejam realizados para melhor exploração do que faz a sinergia acontecer, entender em profundidade as práticas sinérgicas e não-sinérgicas; e investigar mais detalhadamente os antecedentes ou possíveis mediadores de fatores que influenciam sinergias juntamente com a influência de pressões institucionais, além de propor que seu modelo de estudo de sinergia seja aplicado também para analisar a sinergia de práticas *lean* com práticas sociais e ambientais.

Sob a ótica da sustentabilidade econômica, cujo propósito é a criação de empreendimentos viáveis e atraentes para os investidores, a implantação de práticas *lean* trás benefícios para as empresas (Helleno, de Moraes, & Simon, 2016). Um aspecto que tem atraído crescente interesse dos pesquisadores é a identificação dos fatores que explicam os resultados operacionais e financeiros que resultam da aplicação de práticas *lean* a médio e longo prazo (Moyano-Fuentes & Sacristán-Díaz, 2012). Os autores Martinez-Jurado & Moyano-Fuentes (2014) sugerem que pesquisas sejam desenvolvidas para determinar os fatores críticos que afetam a sustentabilidade dos resultados da empresa ao longo das diversas fases de implantação

da gestão *lean* e que métodos e ferramentas sejam criados para facilitar o controle e evolução desse tipo de gestão.

Já em relação ao olhar social da sustentabilidade, esse pilar requer avaliar o impacto no ambiente social considerando os *stakeholders* envolvidos (Faulkner & Badurdeen, 2014). Quando se trata de um ambiente produtivo, os consumidores mais interessados são os empregados e os aspectos que podem ser avaliados são os riscos à saúde e segurança (Faulkner & Badurdeen, 2014; Helleno, de Moraes, & Simon, 2016). Segundo Martinez-Jurado & Moyano-Fuentes (2014), pesquisas que relacionam práticas *lean* com sustentabilidade social são inconclusivas. De um lado o impacto é positivo quanto ao aumento da autonomia do funcionário, melhores estações de trabalho e aumento da motivação. Do outro lado observa-se um impacto negativo como aumento do stress, monotonia diante da padronização dos processos e redução da qualidade de vida. Os autores sugerem ainda que pesquisas sejam desenvolvidas para olhar com mais profundidade os efeitos da gestão *lean* nos funcionários, inclusive adotando metodologias qualitativas.

Nesse contexto, o uso do Mapeamento de Fluxo de Valor (*Value Stream Mapping* – VSM) tem recebido atenção, pois trata-se de uma importante ferramenta na LM para identificar desperdício, podendo ser adaptada a manufatura verde ou sustentável quando necessário (Faulkner & Badurdeen, 2014; Vinodh, Arvind, & Somanaathan, 2011). É um método simples que se utiliza do aspecto visual, utilizando figuras e ícones padronizados, para a representação do fluxo de valor de um produto e todas as suas atividades (Alvandi, Li, Schönnemann, Kara, & Herrmann, 2016). O fluxo de valor é definido como o sequenciamento de todas as ações, as que agregam e não agregam valor, necessárias para entregar o produto ao cliente: a produção desde a matéria prima até o cliente, e ao fluxo de design desde sua concepção até seu lançamento (Rother & Shook, 1999). Apesar de sua facilidade de uso, o VSM é limitado à representação de um produto ou fluxo familiar de produtos e fornece apenas uma imagem instantânea estática da cadeia de processo (Alvandi et al., 2016). Além disso, a metodologia para construção do VSM tradicional não leva em consideração desempenho ambiental e social assim como examina aspectos econômicos de uma linha de produção, muitos dos quais traduzidos em tempo (tempo de ciclo, tempo de entrega, tempo de setup, etc.) (Faulkner & Badurdeen, 2014; Helleno, de Moraes, & Simon, 2016). Incorporar a capacidade de capturar o desempenho ambiental e social visualmente através do VSM irá aumentar sua utilização como uma ferramenta utilizada para avaliação de processos sob a perspectiva da sustentabilidade (Faulkner & Badurdeen, 2014). Um VSM abrangente para a avaliação da sustentabilidade não deve apenas servir como uma

ferramenta para ajudar a identificar áreas de potenciais resíduos / impactos econômicos, ambientais e sociais, mas também deve incorporar métodos para representar visualmente as métricas no VSM (Faulkner & Badurdeen, 2014).

A partir do exposto acima e aceitando a hipótese de que as ferramentas exercem um papel fundamental no sucesso da LM considerando aspectos da sustentabilidade, emergem as seguintes perguntas de pesquisas: quais são os modelos de VSM sustentável propostos até o momento? A ferramenta VSM é adequada para analisar aspectos da sustentabilidade nas operações produtivas? O objetivo desse trabalho é analisar a produção científica dos últimos 10 anos (2007 a 2017) a cerca de modelos de VSM voltados para a questão da sustentabilidade. Para tal, na Seção 2 é apresentada a metodologia utilizada seguida das análises na Seção 3. O trabalho é finalizado na Seção 4, com as considerações finais.

2. Metodologia

De forma a responder as questões mencionadas anteriormente foi conduzida a construção e análise do portfólio bibliográfico sobre VSM sustentável organizada em três etapas: coleta do material, categorização do material e resultados e discussão. A coleta de material foi realizada com base nos últimos 10 anos de publicação (2007 a 2017), considerando artigos científicos publicados em revistas, em inglês e na base de dados Scopus. Eixos de busca foram definidos baseado nos termos “*value stream map*”, “*sustainability*”, “*green*”, “*environmental*”, “*social*”, “*economic*” e “*cost*”. Dos 61 artigos selecionados, resultaram em 14 após leitura de título, palavras chaves e resumo. Alguns modelos, apesar de terem sido nomeado pelo autores como um VSM, foram excluídos da análise como o caso de Lai, Harjati, McGinnis, Zhou, & Guldborg (2008), pois se descaracterizaram por completo da metodologia VSM tradicional, onde há o fluxo de informação, de material e a linha de tempo.

3. Análise da literatura

A lista dos 14 artigos selecionados contendo os indicadores de sustentabilidade é apresentada na Tabela 1. Um número de identificação é utilizado para cada artigo a fim de facilitar as discussões adiante. Os artigos selecionados foram publicados em 11 revistas diferentes. Entre os periódicos com o maior número de ocorrências no assunto estão *Journal of Cleaner Production* (3 ocorrências) e *Clean Technologies and Environmental Policy* (2 ocorrências), que correspondem a 37% dos artigos contendo propostas VSM orientado a sustentabilidade. Quanto ao período de tempo das publicações, nos últimos 10 anos as

publicações se concentram a partir de 2014 com tendência ascendente. No total, 48 autores foram identificados, sendo afiliados a 15 países diferentes onde se destacam em publicações Estados Unidos, Índia, Grécia e Alemanha, como observado na Figura 1. Chama atenção a restrita parceria de publicação entre países, sendo somente 6 artigos publicados em conjunto.

Tabela 1 - Artigos selecionados

No.	Autor/Ano	Título
1	Alvandi S. et al. (2016)	Economic and environmental value stream map (E2VSM) simulation for multi-product manufacturing systems
2	Davies E., van der Merwe K.R. (2016)	Methodology to produce a water and energy stream map (WESM) in the South African manufacturing industry
3	Faulkner W., Badurdeen F. (2014)	Sustainable Value Stream Mapping (Sus-VSM): Methodology to visualize and assess manufacturing sustainability performance
4	Folinas D., et al. (2014)	Greening the agrifood supply chain with lean thinking practices
5	Frazier R.S. (2008)	Bandwidth analysis, lean methods, and decision science to select energy management projects in manufacturing
6	Helleno A.L., et al. (2017)	Integrating sustainability indicators and Lean Manufacturing to assess manufacturing processes: Application case studies in Brazilian industry
7	Jarebrant C., et al. (2016)	ErgoVSM: A Tool for Integrating Value Stream Mapping and Ergonomics in Manufacturing
8	Jia S., et al. (2017)	Therblig-embedded value stream mapping method for lean energy machining
9	Müller E., et al. (2014)	A method to generate energy value-streams in production and logistics in respect of time- and energy-consumption
10	Ng R., et al. (2015)	Integrating and implementing Lean and Green practices based on proposition of Carbon-Value Efficiency metric
11	Rosenbaum S., et al. (2014)	Improving environmental and production performance in construction projects using value-stream mapping: Case study
12	Sunk A., et al. (2017)	Developments of traditional value stream mapping to enhance personal and organizational system and methods competencies
13	Vinodh S., et al. (2011)	Tools and techniques for enabling sustainability through lean initiatives
14	Vinodh S., et al. (2016)	Life cycle assessment integrated value stream mapping framework to ensure sustainable manufacturing: A case study

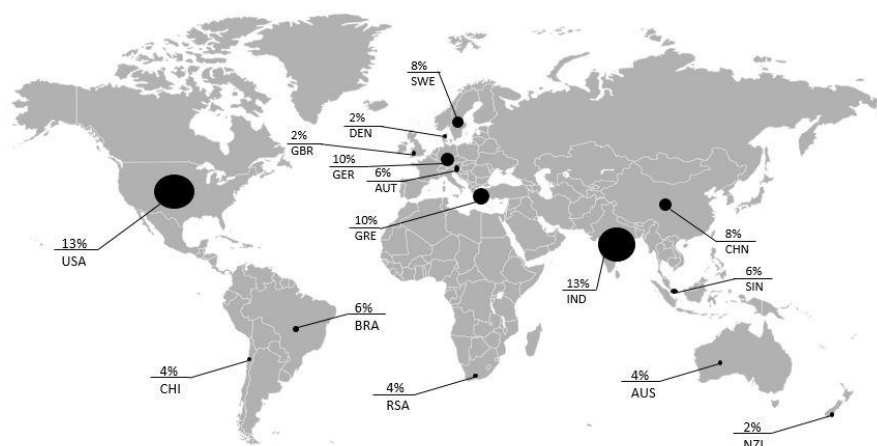


Figura 1 – Mapa dos países de origem das publicações

Dentre os 14 modelos encontrados na literatura, apenas 5 são teóricos e não foram validados na prática. Os modelos de Faulkner & Badurdeen (2014) e Vinodh, Arvind, & Somanaathan (2011) são os mais citados até o momento, no entanto, o primeiro, juntamente com os modelos de Helleno, de Moraes, & Simon (2016) e Vinodh, Ben Ruben, & Asokan (2016) são os únicos que abordam os três pilares da sustentabilidade.

A forma visual de VSM mais comum quando se incorporam indicadores de sustentabilidade é acrescentá-los abaixo dos dados de cada processo ou ainda como na linha de tempo, como exemplo segue ver Figura 2 onde apresenta o VSM sustentável de Helleno, de Moraes, & Simon (2016).

A Tabela 2 resume todos os modelos de VSM avaliados e detalha os indicadores para cada pilar da sustentabilidade. As seções seguintes tratam das discussões baseado nessa tabela.

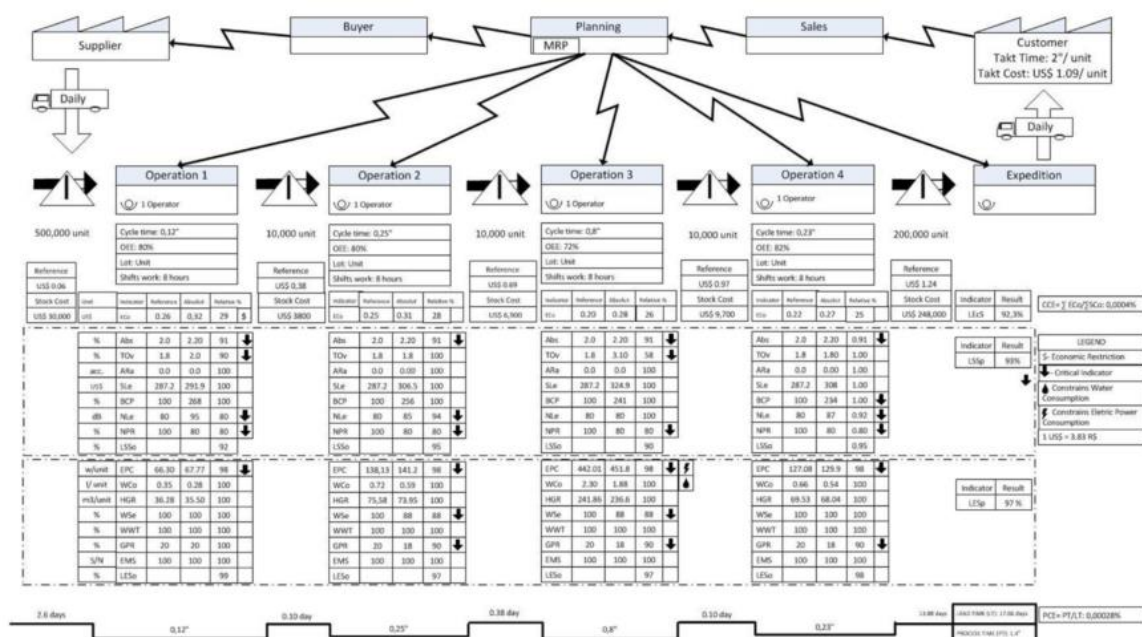


Figura 2 - VSM sustentável
Fonte: Helleno, de Moraes, & Simon (2016)

3.1. O pilar da sustentabilidade ambiental no VSM

Indicadores de consumo de energia, consumo de água, consumo de material virgem e emissão de CO₂ são os indicadores mais utilizados nos modelos estudados para representar o pilar ambiental da sustentabilidade. A medição desses consumos usando o VSM permite identificar os processos com maior impacto ambiental para posterior análise e melhoria, inclusive análise financeira. A seguir vamos comentar a forma de medição para cada uma dessas métricas.

Tabela 2 – Artigos avaliados

	Indicadores	Artigo													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Sustentabilidade Ambiental	Consumo de energia real	✓	✓	✓	✓	✓	✓								
	Consumo de energia real AV/NAV	✓	✓	✓					✓	✓					✓
	Consumo de energia especificada				✓	✓									
	Consumo Energia NAV (atual - mínima)					✓									
	Taxa de valor de energia % (energia min necessária/energia total usada)					✓									
	Consumo de água real		✓	✓	✓		✓							✓	✓
	Consumo de água especificada			✓	✓										✓
	Quantidade de água perdida			✓											✓
	Eutrofização da água														✓
	Consumo de material													✓	
	Diferença de consumo de material (antes e depois da operação)														✓
	Emissão de CO ₂ AV/NAV	✓	✓								✓				
	Emissão de gases nocivos (HGR)						✓								
	Pegada de carbono														✓
	Acidificação do ar														✓
	Consumo de óleo e refrigerante para máquinas														✓
	Geração de resíduos perigosos													✓	
	Segregação de resíduos						✓						✓		
	Descarte e rastreabilidade de resíduos						✓								
	Desperdício de metal (qt utilizada - qta especificada)											✓			
	Desperdício de madeira (qt utilizada - qta especificada)											✓			
	Desperdício de concreto (qt utilizada - qta especificada)											✓			
	Desperdício de combustível (qt utilizada - qta especificada)											✓			
	Taxa do uso de produtos reciclados						✓								

	Desvio de aterro (qt de material reciclado)									✓	
	Nível de sustentabilidade ambiental				✓						
Sustentabilidade Econômica	Indicadores básicos do VSM tradicional	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Custo da energia consumida	✓									
	Custo de operação AV (material, máquina, mão de obra)					✓					✓
	Custo efetivo AV (custo de operação/OEE)					✓					
	Custo NAV (estoque, custos retidos)					✓					✓
	Takt cost (custo alvo)					✓					
	Eficiência do ciclo de custo (custo AV + custo NAV)					✓					
	Nível de sustentabilidade econômica (takt cost / custo AV)					✓					

(Continua)

Tabela 2 (Continuação).

Sustentabilidade Social	Índice de carga física (PLI)	✓									✓
	Riscos por sistemas elétricos	✓									✓
	Riscos por produtos químicos perigosos/materiais usados	✓									✓
	Riscos por sistemas pressurizados	✓									✓
	Riscos por componentes de alta velocidade	✓									✓
	Nível de ruído	✓				✓					✓
	Absenteísmo					✓					
	Treinamento					✓					
	Turnover					✓					
	Taxa de acidentes					✓					
	Nível salarial/benefícios					✓					
	Proporção de produção nacional					✓					
	Postura						✓				
	Força						✓				
	Variação física						✓				
	Porosidade de exposição						✓				

Sustentabilidade		Nível de sustentabilidade social	Nível de sustentabilidade ambiental	Nível de sustentabilidade econômica	Nível de sustentabilidade social	Eficiência de tempo AAV	Eficiência de energia de AAV	Eficiência de energia de AV por Therblig
Nome do VSM	Economic and environmental VSM (E2VSM)							
	Water and Energy Stream Mapping (WESM)							
	Sustainable VSM (Sus-VSM)							
	Energy VSM (EVSM)							
	ErgoVSM	✓						
	Therblig-embedded VSM (TVSM)					✓	✓	
	Energy VSM (EVSM)					✓	✓	
	Carbon-VSM (CVE-VSM)							✓
	Matriz eco-funcional integrada ao VSM							
	Sustainable VSM (Sus-VSM)							

Legenda: AV – agrega valor, NAV – não agrega valor.

3.1.1. Energia

O indicador para energia em geral foca no consumo de energia por cada processo do VSM. Nenhum modelo propôs medir o consumo de energia que inclui iluminação, aquecimento e resfriamento de um edifício, ou qualquer outro consumo de energia que não dependa da quantidade de produtos fabricados. Consumo de energia é a métrica mais utilizada dentro todos os VSMs estudados.

Alvandi *et al.*, (2016) mediu o consumo de energia detalhando a nível de fábrica, processo e produto. Nos modelos de Faulkner & Badurdeen (2014), Helleno, de Moraes, &

Simon (2016) e Vinodh, Ben Ruben, & Asokan (2016) a métrica de consumo de energia foi medida para cada processo e entre processos, como transporte e armazenamento.

Frazier (2008) mediu o consumo de energia real e o especificado para avaliar o desperdício de energia. Apesar do autor não apresentar visualmente seu modelo EVSM, o autor propõe a medição que chama de taxa de valor energia (*energy value ratio* – EVR), baseada na energia mínima necessária pela energia total usada. Esse valor, segundo o autor, demonstra a fração de energia consumida para produzir a transformação que realmente adicionou valor ao produto. O autor também propõe a medição da quantidade de energia que não agrega valor, calculada a partir da energia total usada subtraída a energia mínima necessária.

Müller, Stock, & Schillig (2014) estudaram a energia consumida nas etapas de fabricação em máquinas fresadoras, onde há retirada de material. Os autores propõem um modelo de VSM onde se avalia a energia consumida em etapas que agregam valor (AV), onde há retirada de material, e que não agregam valor (NAV), onde não há retirada de material como modo de espera, posicionamento, configuração (ver Figura 3).

Similar ao modelo anterior, Jia et al. (2017) também propôs um VSM adaptado para avaliar o consumo de energia em máquinas de retirada de material. Assim como o modelo anterior, o VSM não apresentou o fluxo de informação e focou no fluxo de material e linha de tempo, fazendo uso de *therbligs*, que são símbolos que representam a menor unidade de movimento dentro de cada atividade da máquina estudada. A Figura 4 apresenta o modelo proposto, sendo que *therbligs* azuis representam movimentos da máquina que NAV, e os vermelhos sendo os que AV.

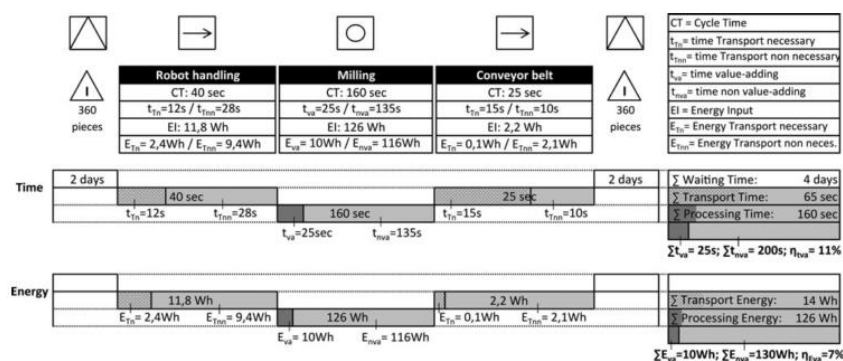


Figura 3 – EVSM
Fonte: Müller, Stock, & Schillig (2014)

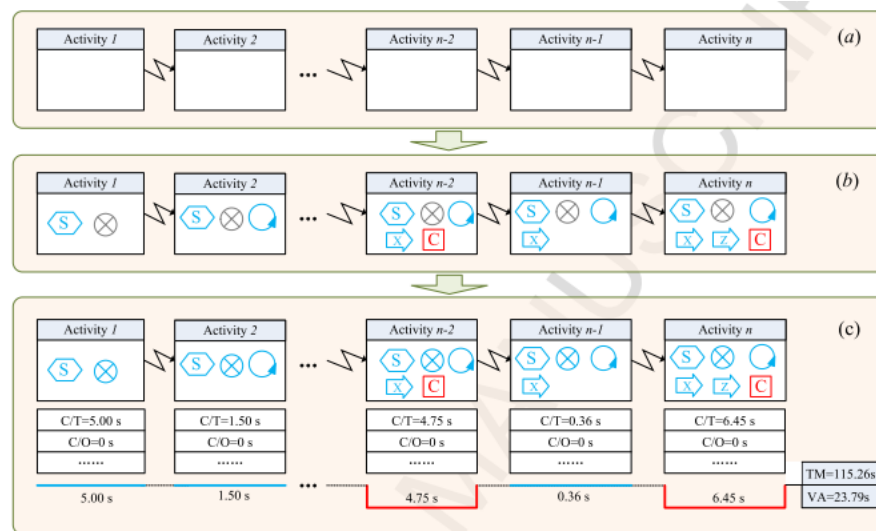


Figura 4 - TVSM
Fonte: Jia *et al.* (2017)

Müller, Stock, & Schillig (2014) também abordaram energia em atividades de que AV e NAV em seu EVSM. Davies & van der Merwe (2016) desenvolveram um VSM para ajudar os profissionais de fabricação a realizar projetos eficazes de economia de energia e água. A ferramenta é chamada de Mapa de Fluxo de Água e Energia (WESM), onde foco é a eficiência energética e de água. O artigo não exemplifica com detalhes a medição e o visual do VSM, deixando dúvidas quanto a real aplicação.

É importante observar as diferentes formas de avaliar o consumo de energia que AV e que NAV. Os modelos de Davies & van der Merwe (2016), William Faulkner & Badurdeen (2014), Jia *et al.* (2017), Müller *et al.* (2014) e Vinodh *et al.* (2016) avaliam a energia que AV e NAV baseada nas operações (AV) e entre operações (NAV). Ao contrário de Alvandi *et al.* (2016) que avalia ambas energias que AV e NAV para cada etapa do processo. Outra forma ainda de medir energia que NAV foi proposta por Frazier (2008), que se baseia na diferença de energia especificada e energia utilizada.

3.1.2. Água

Nos modelos propostos por Faulkner & Badurdeen (2014) e Vinodh, Ben Ruben, & Asokan (2016) é medida a quantidade de água necessária (por especificações), usada (real) e perdida para cada uma das etapas do processo. Adicionando esta métrica de três partes para o consumo de água no Sus-VSM, é possível avaliar a eficácia do uso da água e melhorias potenciais. Vinodh, Ben Ruben, & Asokan (2016) acrescenta a medida de eutrofização da água, baseada na ferramenta de LCA (*Life Cycle Assessment*). Similar a essa métrica é o modelo de

Frazier (2008), que mediu o consumo real de água e o especificado para avaliar o desperdício de água. Helleno, de Moraes, & Simon (2016) utilizou o consumo simples de água em cada processo do VSM.

No VSM proposto por Vinodh, Arvind, & Somanaathan (2011), apesar dos autores abordarem questões de meio ambiente, saúde e segurança (*Environmental, Health and Safety - EHS*), os mesmos apenas demonstram a medição de indicadores considerados no pilar ambiental como consumo de água e material. Por outro lado, os mesmos propõem que questões de EHS devem ser avaliadas somente nas operações que podem causar riscos para os trabalhadores; pedidos regulatórios e oportunidades para reduzir a poluição e o custo dos materiais, e não necessariamente em todas as operações do VSM.

3.1.3. Material

Diferente dos demais, o Sus-VSM de Faulkner & Badurdeen (2014) monitora a quantidade de material utilizada e também a quantidade de material adicionado ou removido em cada etapa do processo. Para um determinado processo, como a moagem, a quantidade removida será colocada abaixo da linha pontilhada e vice-versa para um processo aditivo, como visto na Figura 5. Para um processo que não adiciona nem remove material do produto, o registro do uso do material bruto será representado pela linha pontilhada. A massa total adicionada e removida pode ser agregada para exibição no extremo mais à direita como mostrado. Os autores ainda comentam que quando um produto requerer mais de uma matéria-prima, o material mais importante de uma perspectiva de custo ou qualquer outro critério relevante para ser incluído no Sus-VSM deve ser identificado. No entanto, incluindo múltiplas linhas para representar diferentes materiais no Sus-VSM reduzirá a clareza visual e deve ser feita somente quando absolutamente necessário.

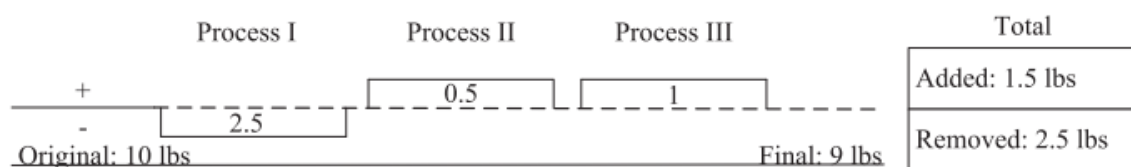


Figura 5 - Representação visual do uso de material virgem no Sus-VSM

Fonte: Faulkner & Badurdeen (2014)

Vinodh, Ben Ruben, & Asokan (2016) também avaliam a diferença de material antes e depois da operação, sinalizando no VSM se o material foi adicionado ou removido. Além disso, também mede o consumo de óleo e refrigerante utilizado nas máquinas.

Helleno, de Moraes, & Simon (2016) utilizaram alguns indicadores referentes a materiais: quantidade de resíduo de material, quantidade de resíduo de material tratável e taxa de uso de produto reciclado no processo. Sunk, Kuhlmann, Edtmayr, & Sihn (2017) também avaliaram o desperdício de material, no entanto, de uma forma mais aprofundada. A métrica utilizada foi por unidade de produto produzido levando em consideração o desperdício gerado no *setup*, peças não conformes e diferença da quantidade de material usado e especificado (sobrepeso). Ainda nessa linha de desperdício de material, o modelo proposto por Rosenbaum, Toledo, & González (2014) mede os desperdícios de materiais na construção de um hospital, a fim de melhorar seu desempenho ambiental e produtivo durante o estágio estrutural de trabalho concreto. A quantidade de material desperdiçada foi considerada como a diferença entre a quantidade utilizada e a quantidade especificada. Além disso, foi medido o percentual de material reciclado no processo, chamado pelos autores como desvio de aterro.

3.1.4. Emissão CO₂ e outros

Alvandi, Li, Schönmann, Kara, & Herrmann (2016) calcularam a emissão de CO₂ baseado no consumo de energia em cada etapa do E2VSM proposto avaliando dentro de cada processo a parte que AV e NAV, não foram consideradas as etapas entre as operações. Essa avaliação foi feita baseada no consumo de energia. Ruisheng Ng, Low, & Song (2015) também mediu a emissão de CO₂ e utilizou uma linha similar a linha de tempo para demonstrar a emissão de CO₂ que AV e NAV baseado nas etapas do VSM que já são consideradas AAV (operação) e ANAV (entre operações).

Helleno, de Moraes, & Simon (2016) mediram a emissão de gases nocivos e se restringiu as operações, ou seja, somente nas etapas que AV. Já Vinodh, Arvind, & Somanaathan (2011) mediram a quantidade de geração de resíduos perigosos. Vinodh, Ben Ruben, & Asokan (2016) acrescenta indicadores baseados na ferramenta de LCA (*Life Cycle Assessment*) como acidificação do ar e pegada de carbono.

3.2. O pilar da sustentabilidade econômica no VSM

O desempenho econômico de um sistema, em termos de valor agregado e custos incorridos, pode ser avaliado com o VSM convencional, utilizando métricas como horários de ciclo, tempos de transição, horários de funcionamento, número de operadores envolvidos, nível de inventário em andamento, etc. (Faulkner & Badurdeen, 2014). Para os modelos de VSM que não informaram nenhum indicador econômico, mas que mantiveram em seus modelos as informações básicas de um VSM tradicional, citadas anteriormente, foi informado na Tabela 2

como indicadores do pilar econômico. No entanto, além desses indicadores alguns autores propuseram novas métricas que podem ser consideradas como parte do pilar de sustentabilidade econômica. O mais comum, provavelmente devido a sua facilidade de medição, é o custo do indicador ambiental proposto (por exemplo, custo da energia, água ou material consumidos), é o caso das pesquisas de Alvandi, Li, Schönnemann, Kara, & Herrmann (2016), Davies & van der Merwe (2016).

O VSM sustentável de Helleno, de Moraes, & Simon (2016) acrescentou diversos indicadores econômicos, inclusive o *Takt Cost* que determina o custo de operações considerando um desempenho de classe mundial (*world-class manufacturing* – WCM) de 85% de OEE. A sustentabilidade do processo de fabricação na dimensão econômica foi avaliada através da Eficiência do Ciclo de Custo e do Nível de Sustentabilidade Econômica.

3.3. O pilar da sustentabilidade social no VSM

No Sus-VSM de Faulkner & Badurdeen (2014) são selecionados dois indicadores para o pilar social (i) índice de carga física e (ii) riscos do ambiente de trabalho. A intenção do primeiro indicador não é realizar uma avaliação ergonômica abrangente, mas identificar tarefas em risco para análise posterior. Por isso, é desejável uma abordagem simples. O índice de carga física (PLI) é uma simples medida bruta determinada usando as respostas a um questionário e leva em consideração a frequência de ocorrência (variando de “nunca” até “frequentemente”) de diferentes posições do corpo e o manuseio de várias cargas. A segunda medida refere-se aos riscos do ambiente de trabalho e é dividida em cinco categorias de risco devido a: Sistemas Elétricos (E), Produtos Químicos Perigosos/Materiais Usados (H), Sistemas Pressurizados (P), Componentes de Alta Velocidade (S) e nível de ruído. Para esses indicadores é utilizada uma escala de 1 a 5 e entrevistas com os empregados para definir qual a probabilidade e impacto de tal risco, sendo 1 quando não se aplica e 5 para quando existe e há grande probabilidade de impacto e de ocorrência.

Helleno, de Moraes, & Simon (2016) também levaram em consideração parâmetros de processo de produção que interagem diretamente com empregados e a comunidade onde a empresa está inserida. Absenteísmo, *turnover*, taxa de acidentes e nível de ruído são indicadores relacionados ao nível de satisfação dos empregados e as condições de trabalho. Além disso, os autores definiram a o indicador de salário e benefícios financeiros, usados também indiretamente nos indicadores econômicos para determinar o custo de operação. A contribuição da indústria para a comunidade foi avaliada como a proporção de produção nacional. Ao final,

é determinado o indicador de sustentabilidade social, sendo a média relativa dos indicadores sociais.

Jarebrant, Winkel, Johansson Hanse, Mathiassen, & Öjmertz (2016) propôs o modelo ErgoVSM que considerou a exposição física do trabalhador onde há um risco aumentado de desenvolvimento de doenças músculo-esqueléticas (MSD). As avaliações de ergonomia consideram os fatores de risco para MSD em quatro categorias principais: posturas, forças, variação física e porosidade de exposição (trabalho intenso). As avaliações são realizadas com empregados que avaliam cada categoria em uma escala de 1 a 10.

Ng, Low, & Song (2015) propõe um VSM com medição da eficiência do valor de carbono (*Carbon Value Efficiency* – CVE) onde o conceito geral é acompanhar a quantidade de tempo de valor adicionado criada por unidade de pegada de carbono. Esse valor reflete a proporção das atividades de agregação de valor por impacto ambiental, ou seja, quanto maior o valor CVE, melhor. Essa proposta de medição busca criar mais valor com menores impactos ambientais.

3.4. Indicadores de desempenho da sustentabilidade no VSM

Além dos indicadores para cada pilar da sustentabilidade, analisou-se também se os modelos apresentam alguma proposta de métrica de sustentabilidade a nível macro para o VSM. Mesmo que o modelo não tenha abrangido os três pilares, foi considerado nessa análise os que propuseram a medição também por pilar.

Helleno, de Moraes, & Simon (2016) foi o modelo mais completo estudado e propôs a medição do nível de sustentabilidade para cada um dos três pilares. Jia et al. (2017) e Müller, Stock, & Schillig (2014), cujos modelos estudados são bastante similares, definiram a eficiência de tempo e de energia para as AAV.

3.5. Considerações finais

Os modelos estudados nessa pesquisa apresentam diferentes níveis de aprofundamento em relação a medição de indicadores de sustentabilidade. Se o desejo da empresa é manter o olhar simplificado e estático do VSM, ou seja, utilizar valores médio de tempo de ciclo, *setup* e OEE para um VSM de uma família de produtos, entende-se que faz sentido também manter essa simplificação para avaliação da sustentabilidade. Por exemplo, considerar o consumo médio de energia, material ou água para um produto ou para uma família de produtos somente nas etapas dos processos onde agrega valor. No entanto, se o objetivo é utilizar valores mais

reais, buscando o detalhe da curva de consumo de água, energia, CO₂, etc., seja por exigência da empresa ou do produto é de relativa complexidade e importância, essa simplificação pode impactar no resultado e sua utilização não é indicada. Para esses casos, os modelos de VSM com cálculos mais aprofundados, como os dos Alvandi, Li, Schönemann, Kara, & Herrmann (2016), Jia et al. (2017) e Müller (2009), e o auxílio de um software de simulação são mais apropriados.

Em relação a número de indicadores, os modelos de Faulkner & Badurdeen (2014), Helleno, de Moraes, & Simon (2016) e Vinodh, Ben Ruben, & Asokan (2016) são os únicos que abordam os três pilares da sustentabilidade. Os demais modelos concentram em apenas um pilar ou ainda abordando o econômico e social, mas com poucos indicadores.

Em relação ao pilar social foi possível identificar diversas formas de medi-lo. Faulkner & Badurdeen (2014) focou em riscos à segurança do trabalho, Helleno, de Moraes, & Simon, (2016) focou na satisfação do trabalhador e na comunidade e Jarebrant, Winkel, Johansson Hanse, Mathiassen, & Öjmertz (2016) abordou aspectos ergonômicos das operações. Além disso, somente o modelo de Helleno, de Moraes, & Simon (2016) utilizou parte dos indicadores sociais no pilar econômico. Praticamente nenhum modelo propôs avaliar economicamente o pilar social, o que ocorre com frequência no pilar ambiental. Situação essa decorrendo, provavelmente, da facilidade de cálculo.

Dos 14 modelos propostos, 13 são voltados para área de manufatura e apenas o modelo de Rosenbaum, Toledo, & González (2014) abordou a área de desenvolvimento de projetos. Nenhum modelo proposto foi testado em uma empresa de serviço.

Baseado nos artigos apresentados e nas análises realizadas, entende-se que os critérios abaixo são importantes na construção do VSM sustentável:

- a) Examinar as melhores práticas atualmente utilizadas e como elas podem ser adaptadas para atender aos requisitos TBL, como ponto de partida;
- b) Selecionar o número mínimo de métricas que proporcionará maior benefício, ou seja, focar em poucos indicadores que sejam amplos e aplicáveis;
- c) Adequar os indicadores ambientais e sociais conforme a relevância do setor em que a companhia está inserida. Por exemplo, as métricas mais adequadas para avaliar o desempenho ambiental e social de uma linha de fabricação de produtos metálicos e discretos provavelmente serão diferentes das exigidas para uma linha de processamento

químico. Por outro lado, uma linha de produção de alimentos pode exigir um conjunto diferente de métricas para avaliar condições de higiene e segurança alimentar;

- d) Utilizar o recurso de simulação de eventos discretos quando desejar avaliar cenários futuros de processos com significativo impacto em algum dos pilares da sustentabilidade. Apesar de toda tecnologia de softwares de simulação, atualmente ainda são recursos caros e que dispendem muitas horas de programação para chegar a um VSM próximo ao real. Ou seja, usá-lo como vantagem mas avaliar se o esforço necessário vale a pena.

4. Conclusões

A necessidade de clarificar os impactos dos processos nos três pilares da sustentabilidade e ainda identificar quais são e onde estão os desperdícios que os traduzam, tornou o VSM uma ferramenta popular no entre nas empresas e academia. A revisão de literatura realizada nesse trabalho, analisando os indicadores propostos e as diferentes formas de medição, resultando na Tabela 2, responde a primeira pergunta de pesquisa levantada na seção 1 deste artigo. Em relação a segunda pergunta, verificou-se 26 indicadores diferentes para o pilar ambiental, 8 para o econômico e 17 para o social. Também foram apresentados modelos com poucos e muitos indicadores para cada pilar, bem como com medições simples e complexas, fazendo uso inclusive de software de simulação. Isso mostra a versatilidade da ferramenta VSM, podendo-se construir modelos simples ou mais completos para avaliação da sustentabilidade. Isso, portanto, responde a segunda pergunta de pesquisa onde conclui-se que a ferramenta VSM é sim adequada para analisar aspectos da sustentabilidade.

É importante salientar que a busca na literatura se restringiu a publicações do tipo artigo em jornais e somente na base de dados Scopus. Como sugestão para trabalho futuro é indicado estender a busca para artigos também de conferência e diferentes bases de dados a fim de buscar outras publicações que possam ser relevantes. Além disso, outras formas de incorporar a ergonomia no VSM representando o pilar social (utilizando também o conceito de desperdício traduzido no tempo), inclusive definindo indicadores econômicos também para o pilar social na busca de identificar oportunidades de melhoria que traduzam em ganho financeiro devem ser explorados. No pilar ambiental, sugere-se estudar a integração de indicadores voltados a economia circular, que é um modelo de negócio tendência em diversos países da Europa e Ásia. Algo que ainda não foi consolidado é uma proposta de métrica em nível de sustentabilidade que englobe os três pilares, similar ao conhecido indicador de OEE da LM, e que pode ser utilizado

para efeito comparativo entre empresas e/ou mercados e, até mesmo, para fins de auditoria. Por fim, sugere-se testar modelos de VSM sustentável em empresas de serviço a fim de identificar possíveis particularidades específicas do setor.

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq pelo suporte recebido para o desenvolvimento desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- Alvandi, S., Li, W., Schönemann, M., Kara, S., & Herrmann, C. (2016). Economic and environmental value stream map (E2VSM) simulation for multi-product manufacturing systems. *International Journal of Sustainable Engineering*, 9(6), 354–362.
- Campos, L. M. S., & Vazquez-Brust, D. A. (2016). Lean and green synergies in supply chain management. *Supply Chain Management*, 21(5), 627–641. <https://doi.org/10.1108/SCM-03-2016-0101>
- Corbett, C. J., & Klassen, R. D. (2006). Extending the Horizons: Environmental Excellence as Key to Improving Operations. *Manufacturing & Service Operations Management*, 8(1), 5–22. <https://doi.org/10.1287/msom.1060.0095>
- Davies, E., & van der Merwe, K. R. (2016). Methodology to produce a water and energy stream map (WESM) in the South African manufacturing industry. *South African Journal of Industrial Engineering*, 27(3SpecialIssue), 219–229. <https://doi.org/10.7166/27-3-1657>
- Dües, C. M., Tan, K. H., & Lim, M. (2013). Green as the new Lean: How to use Lean practices as a catalyst to greening your supply chain. *Journal of Cleaner Production*, 40, 93–100. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.12.023>
- Faulkner, W., & Badurdeen, F. (2014). Sustainable Value Stream Mapping (Sus-VSM): methodology to visualize and assess manufacturing sustainability performance. *Journal of Cleaner Production*, 85, 8–18.
- Faulkner, W., & Badurdeen, F. (2014). Sustainable Value Stream Mapping (Sus-VSM): Methodology to visualize and assess manufacturing sustainability performance. *Journal of Cleaner Production*, 85, 8–18. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.05.042>
- Fliedner, G., & Majeske, Ka. (2010). Sustainability: The New Lean Frontier. *Production and Inventory Management Journal*, 46(1), 6–13.
- Frazier, R. S. (2008). Bandwidth analysis, lean methods, and decision science to select energy management projects in manufacturing. *Energy Engineering: Journal of the Association of Energy Engineering*, 105(1), 24–45. <https://doi.org/10.1080/01998590809509364>
- Garza-Reyes, J. A. (2015). Lean and Green – A systematic review of the state of the art literature. *Journal of Cleaner Production*, 102, 18–29. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.04.064>
- Greinacher, S., Moser, E., Freier, J., Muller, J., & Lanza, G. (2016). Simulation-based Methodology for the Application of Lean and Green Strategies Depending on External Change Driver Influence. In *23rd CIRP Conference on Life Cycle Engineering, LCE 2016, May 22, 2016 - May 24, 2016* (Vol. 48, pp. 242–247). Wbk Institute of Production Science, Karlsruhe Institute of Technology, Kaiserstr. 12, Karlsruhe; 76131, Germany: Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.03.240>

- Helleno, A. L., de Moraes, A. J. I., & Simon, A. T. (2016). Integrating sustainability indicators and Lean Manufacturing to assess manufacturing processes: Application case studies in Brazilian industry. *Journal of Cleaner Production*, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.072>
- Jarebrant, C., Winkel, J., Johansson Hanse, J., Mathiassen, S. E., & Öjmertz, B. (2016). ErgoVSM: A Tool for Integrating Value Stream Mapping and Ergonomics in Manufacturing. *Human Factors and Ergonomics In Manufacturing*, 26(2), 191–204. <https://doi.org/10.1002/hfm.20622>
- Jia, S., Yuan, Q., Lv, J., Liu, Y., Ren, D., & Zhang, Z. (2017). Therblig-embedded value stream mapping method for lean energy machining. *Energy*, 138, 1081–1098. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.07.120>
- Kleindorfer, P. R., Singhal, K., & Wassenhove, L. N. (2009). Sustainable Operations Management. *Production and Operations Management*, 14(4), 482–492. <https://doi.org/10.1111/j.1937-5956.2005.tb00235.x>
- Kruse, A., Butzer, S., Drews, T., & Steinhilper, R. (2015). A Simulation-based Framework for Improving the Ecological and Economic Transparency in Multi-variant Production. *Procedia CIRP*, 26, 179–184. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.07.101>
- Lai, J., Harjati, A., McGinnis, L., Zhou, C., & Guldberg, T. (2008). An economic and environmental framework for analyzing globally sourced auto parts packaging system. *Journal of Cleaner Production*, 16(15), 1632–1646. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.01.011>
- Liker, J. K. (2004). *The Toyota Way: 14 Management Principles from the World's Greatest Manufacturer*. New York: McGraw Hill.
- Martinez-Jurado, P. J., & Moyano-Fuentes, J. (2014). Lean management, supply chain management and sustainability: A literature review. *Journal of Cleaner Production*, 85, 134–150. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.09.042>
- Miller, G., Pawloski, J., & Standridge, C. (2010). A case study of lean, sustainable manufacturing. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 3(1), 11–32. <https://doi.org/10.3926/jiem.2010.v3n1.p11-32>
- Mostafa, S., & Dumrak, J. (2015). Waste Elimination for Manufacturing Sustainability. *Procedia Manufacturing*, 2, 11–16. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.07.003>
- Moyano-Fuentes, J., & Sacristán-Díaz, M. (2012). *Learning on lean: a review of thinking and research*. *International Journal of Operations & Production Management* (Vol. 32). <https://doi.org/10.1108/01443571211226498>
- Müller, E., Stock, T., & Schillig, R. (2014). A method to generate energy value-streams in production and logistics in respect of time- and energy-consumption. *Production Engineering*, 8(1–2), 243–251. <https://doi.org/10.1007/s11740-013-0516-9>
- Müller, H.-E. (2009). Supplier integration: An international comparison of supplier and automaker experiences. *International Journal of Automotive Technology and Management*, 9(1), 18–39. <https://doi.org/10.1504/IJATM.2009.023584>
- Ng, R., Low, J. S. C., & Song, B. (2015). Integrating and implementing Lean and Green practices based on proposition of Carbon-Value Efficiency metric. *Journal of Cleaner Production*, 95, 242–255. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.02.043>
- Ng, R., Low, J. S. C., & Song, B. (2015). Integrating and implementing Lean and Green practices based on proposition of Carbon-Value Efficiency metric. *Journal of Cleaner Production*, 95, 242–255. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.02.043>
- Piercy, N., & Rich, N. (2015). The relationship between lean operations and sustainable operations. *International Journal of Operations and Production Management*, 35(2), 282–315. <https://doi.org/10.1108/IJOPM-03-2014-0143>

Rosenbaum, S., Toledo, M., & González, V. (2014). Improving environmental and production performance in construction projects using value-stream mapping: Case study. *Journal of Construction Engineering and Management*, 140(2). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000793](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000793)

Rother, M., & Shook, J. (1999). *Learning to see: Value Stream Mapping to Add and Eliminate Muda*. Massachusetts: The Lean Enterprise Institute.

Sartori, S., Latrônico, F., & Campos, L. M. S. (2011). Sustentabilidade E Desenvolvimento Sustentável : Uma Taxonomia No Campo Da Literatura. *Ambiente & Sociedade*, XVII(1), 1–22.

Sunk, A., Kuhlang, P., Edtmayr, T., & Sihn, W. (2017). Developments of traditional value stream mapping to enhance personal and organisational system and methods competencies. *International Journal of Production Research*, 55(13), 3732–3746. <https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1272764>

Vinodh, S., Arvind, K. R., & Somanaathan, M. (2011). Tools and techniques for enabling sustainability through lean initiatives. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 13(3), 469–479. <https://doi.org/10.1007/s10098-010-0329-x>

Vinodh, S., Ben Ruben, R., & Asokan, P. (2016). Life cycle assessment integrated value stream mapping framework to ensure sustainable manufacturing: A case study. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 18(1), 279–295. <https://doi.org/10.1007/s10098-015-1016-8>

Womack, J. E., JONES, D., & DANIEL, T. (1996). *Lean Thinking: Banish Waste and Create Wealth in Your Corporation* (2nd ed.). New York: Simon & Schuster.